

Title	一般相対性理論における時空論の実体説と関係説、 そして構造実在論への展開
Author(s)	藤田, 翔
Citation	年報人間科学. 37 p.123-p.141
Issue Date	2016-03-31
oaire:version	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/54589
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

〈論文〉

一般相対性理論における時空論の実体説と関係説、
そして構造実在論への展開

藤田 翔

概要

時間と空間とは何か？この問い掛けに関しては、紀元前より多くの議論が交わされてきた。

近年ではこの問い掛けは、科学の最先端である物理学によって大いに解明されてきた。20世紀初頭にアインシュタインによって提唱された一般相対性理論によれば、時間も空間の一種であり、時空間そのものは構造を持っていて、その構造は存在している物体によって影響を受ける。時間の流れるスピードは一定ではなく、時空間は曲がっているという、当時の常識を越えた発想は、時空の哲学を益々飛躍させた。さらにその後も物理理論は休むことなく進展し、現代宇宙論や量子重力でも時空は4次元を超えて、物理の最も根本的な系（パラメータ）として扱われている。

本論文は、その最も根本的とされる時空間の存在を、改めて哲学的にカテゴライズし、一般相対性理論の枠組みにおいて、時空の実在性にある種の答えを提供することを目的としている。時空に関してその存在を主張する実体説 (substantialism) と、時空をあくまでモノの性質と見なす関係説 (relationism) の長い対立を背景に、構造実在論 (structural realism) という考え方を介入することによって、結局はいずれの相反する立場も突き詰めれば共通して、「時空の本質はその構造全体にある」ということに着眼していることを示す。

キーワード

時空の哲学；実体説；関係説；構造実在論；一般相対性理論

1. はじめに

時間とは何か？そして空間とは何か？我々の日常感覚に最も親しくそして最も根源的な問いかけである。これらの考察の歴史を紐解くと、多くの哲学者や物理学者が独自の見解で「時空間」を捉えていたことがわかる。ニュートンとライプニッツの絶対時空説と関係時空説の議論を皮切りに、主に時空間は中に存在するものとは無関係に独立に存在し得るとする立場と、空間は物体同士の位置関係により、そして時間はそれらの位置の変化としてあくまで後続的に存在するという立場に分かれた¹⁾。

20世紀に入り特殊相対性理論によって、「時間も空間の一種であり、時間の進み方は観測者によって変わってくる」という主張がなされてから時空の哲学は一変した。さらに一般相対性理論によって、それまで曖昧だった時空間の性質は存在する物質の重力場によって相対的に決まるという新たな命題が導入された。この相対性理論の提唱によって、時空の哲学的立場は非常に曖昧なものとなった。例えば仮に時空間というものが実体 (substance) を持っているとするのならば、時空というものは数学的モデルとして表

わされている多様体を指すのか、それとも点同士の構造を表わす計量、すなわち重力場に宿るのか、あるいは多様体と計量を合わせたものに相当するのかが問題となる [4]。近年の時空の哲学では、相対性理論を元に時空は存在する物体とは独立に存在するという実体説 (substantivalism) と、存在する物体同士の関係に還元されるという関係説 (relationism) を発展させた、時空構造実在論 (structural spacetime realism) が提唱された [5]。これは時空はあくまで時空構造として、物体の観測等を通して間接的に表わされているが、時空構造自体は重力場としてモノとは独立に実在しているという、実体説と関係説を半ば調停する中間的な立場でもある。時空に関して座標と計量の情報のみしか与えられていない一般相対性理論にとっては、一見妥当な哲学のように思われる。本論文ではその構造実在論というアイデアが提唱されるまでのプロセス、特に実体説の主張の変遷を中心に、あくまで量子力学より前の物理学の範疇に留った一般相対性理論の時空論の流れを辿り、時空の本質に迫ることを目的としている。

2. 時空理論の変遷と哲学的論争の原点

この章では、ニュートン重力理論の誕生した 17 世紀から近年の相対性理論の誕生までの時空の哲学を簡単に振り返る。

2.1 絶対時空説と相対時空説

古代より別々の運動法則に従っているとされていた、天体の星の動きと地上の物体の自由落下の運動が、実は同じ万有引力の法則に還元されることが示された 17 世紀以来、ニュートンの重力理論はおおよそ完全な物理体系として当時の物理学者に広く認知されてきた。ニュートン力学とは、アイザック・ニュートンによって自身の著である「自然哲学の数学的諸原理」(Mathematical Principles of Natural Philosophy) に挙げられた帰納主義 (科学理論は、現象から引き出し得た内容のみで構成されるべきという立場) に基づいて、構築されたものである²⁾。物体の運動は、ニュートンが挙げた 3 つの法則を軸に、互いに質量を持つ物体は物体間の距離の 2 乗に反比例する力を受けるという万有引力の法則を加えたもので記述される。この後、18 世紀にオイラーらが微分積分学を用いて数学的に定式化し、今日のニュートン力学に至る。この理論は、マクロな系において光速に比べれば無視できる程遅い物理現象を論じる際には、実験的にも矛盾無く整合性が取れている。

ニュートンは物体の運動という概念を持ち出すためにさらに大前提として、物体は予め存在している空間の中をあらゆる場所で一様に流れる時間の中で運動すると表現し、時空間を絶対空間と絶対時間と定め物理的対象物の容れ物 (container) という存在的な特権を与えた。これによると、座標を張った際に空間の各点は中にある物体とは無関係にそれだけで物理的な存在 (substance) であり、時間は物体の状況に限らずに一様に過ぎて行くもので、空間同様に一刻一刻の時点が別々の個体 (substance) として存在している。この絶対時空という存在の中を、物体が力学法則に従って運動しているというのがニュートン自身の哲学で

ある。ニュートンに代表されるこの時空説を時空の実体説 (substantivalism) という³⁾。

これに対してライプニッツは、時間や空間は絶対的な枠組みではなく、空間はそこに存在する物体の位置関係によって相対的に規定されるものであり、時間は物体の位置変化が起こることによって初めて付属的に与えられるものであるという相対時空説を主張した。この時空論では時空はそれだけで存在するものではなく、物体同士の関係という性質に還元されるべきものであり、時空に関する反実在論でもある。この時空説を時空の関係説 (relationism) といい、時空の本質は存在している物体の関係のみにあるとされる⁴⁾。こうしてニュートン力学時代の時空論は実体説と関係説に大別されることになる。一般に物理現象を考える上で、位置変化を見るためには座標系を設定する必要があるが、座標そのものは真空ではなく他の物体、例えば地面や計測器を座標点にして変化を計測している。そういう意味では、相対時空説を支持しているように見えるかもしれない。ただし、その座標系に時計で計った時間を含めた時空点が、そこに存在する物体とは別に物理的な意味を与えられるかどうかというのが、実体説と関係説の争点であり実体説論者は可能だと言い、関係説論者は不可能だと言う⁵⁾。このことは形而上学的な哲学の課題である。しかし、この哲学的立場の違いが明確に表れる物理現象も存在する。それが所謂「ニュートンのバケツ」である。ニュートンのバケツとは、ニュートンが絶対時空の考えを導入した際に、物体が絶対空間に対して行っている運動のことを指す思考実験の名称である。この絶対運動は、他の物体に対して行う見かけの相対運動と区別するために持ち出されたものである⁶⁾。図 1 に示すように、ロープに吊るした水の入ったバケツだけが存在する世界を用意する。ロープを十分に振ってから静かに離すと、ロープの回転がバケツに伝わりバケツが回転を始める。しばらくすると、バケツの回転は水にも伝わりさらに時間が経てばバケツと水は一体となって回転する。ニュートンの言い分としては、最初バケツだけが回転している際には水には何も変化が無いが、水とバケツが共に回転している時は、遠心力によって水がバケツのふちに盛り上がってくる。この遠心力は、水が絶対空間に対して回転している結果働くものであり、相対時空説では説明が付かないとしている。相対時空説によれば、バケツと水だけからなる世界にとって水とバケツが両方回転するという事象には意味はなく、ライプニッツが言う不可識別者の同一性により、この事象は最初のバケツと水が両方共に静止している世界と全く区別がつけられないのである。よって相対時空説の立場では、遠心力は発生せず水がバケツのふちに盛り上がるということも起こらない。水に遠心力が働くのであれば、それは水とバケツが絶対空間に対して回転している結果としか考えられない。だがそもそも仮にこのような実験を現実に行ったとしても、ニュートンの予言通りに水が本当に盛り上がるかどうかは定かではない。結局のところこの思考実験では結果がわからないため、絶対時空の存在を証明するには不十分である。しかし力の働かない等速運動ならまだしも、遠心力という見かけの力を生じてしまう回転の効果をどのように扱うかということは、関係説論者にとって非常に難しい課題であったことは確かである⁷⁾。

そもそもニュートン力学は、ニュートンの時空説を下敷きに構築されたものであるから、物体の運動を考える際にはまず座標を張ることを前提としている。この時点で時空間という枠組みを設定しているために、時空そのものは存在しないという関係説とは相性の悪い側面がある。時空を前提にしているという理論的な性格は、ニュートン力学だけでなく、電磁気学や量子力学、さらには量子力学と同じ 20 世紀前半

に、アルバート・アインシュタインによって発表された一般相対性理論でさえ同様である。そこで理論的には正しいとされているニュートン力学を、座標すなわち時間と空間、さらには質量や力等を前提とせずに物体同士の関係によって構築しようという試みが19世紀後半にエルンスト・マッハによって始められた。これはマッハの「関係説の力学」と呼ばれ、物体間の相対的な距離のみを用いて物体の運動を論じようとする方針だが、実際に定式化したのは後継者、ひいてはマッハの支持者であるシュレディンガーやホフマンらであり、バーバーやドベルティらによって現在も受け継がれている⁸⁾。時空を仮定しない関係説の力学は非常に斬新で発展性もあるが⁹⁾、この論文では主題となる相対性理論の話へと進みたい。

2.2 相対性理論と時空

1904年に誕生した特殊相対性理論によって、従来の時空観は大きな飛躍を遂げた。マイケルソン・モーレーの実験によって示されたのは、光の伝搬速度は光源の速度に依らず一定値 $c=2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ になるという光速度一定の法則である。これによれば、時間の進み方は観測する系によって異なるということに加え、2つの事象（時間と空間で表わされる点）の時間順序や同時性は、観測者によって相対的なものであると結論付けられる。さらに互いに等速運動を行う慣性系においては特別な系は存在せずに、あらゆる自然法則は同じように表わされるはずだという相対性原理が加わる。この前提に従って、時間成分と3次元の空間成分の合計4次元の座標 (t, x, y, z) で作られたある慣性系 K と、この系から見て一定の速度で移動する (t', x', y', z') という別の座標系の張られた慣性系 K' の間に成り立つ関係を考える。光速度一定の法則によれば、光が微小時間 dt または dt' に進む微小距離 $(dx^2+dy^2+dz^2)$ または $(dx'^2+dy'^2+dz'^2)$ は両系で等しいことから、光の経路上にある限りなく隣接した2つの事象には、それぞれの座標系において次の等式が成り立つ：

$$c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 = 0. \quad (1)$$

この無限小の事象間を、時間も含めた距離概念すなわち世界間隔と新しく定める。光の経路の場合は世界間隔がゼロとなるが、慣性系には特別な方向や基準が無いために、一般に2つの事象の世界間隔は慣性系同士の間の座標変換の前後で値が等しい。そこで座標系 (t, x, y, z) において、無限小の世界間隔 ds を

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (2)$$

と改めて定義する。時間を含めて拡張された距離概念、この2次形式により記述される4次元の幾何学は、平坦なユークリッド幾何学の計量を持つミンコフスキー時空で表現される。あらゆる信号の中で光が最も速く伝わることから、ミンコフスキー座標の中で図2に示されるように、因果関係にある時空領域 ($ds > 0$) とそうでない領域 ($ds < 0$) が存在することになる。これも光は瞬時に伝わりとされるニュートン力学にはない概念である。この ds は座標変換に対して不変量であることから、もし慣性系 K' が K から見て x 軸の正の方向に一定の速度 v で遠ざかっているとすれば、 K の座標系 (t, x, y, z) と K' の座標系 (t', x', y', z') の間には、

$$\begin{aligned}
 x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\
 y' &= y \\
 z' &= z \\
 t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

というローレンツ変換が成り立つ。時間の流れる速さは各基準系によって様々であるということから、あらゆる場所で一様に流れる絶対時間の存在が否定された。そして時間も空間の一種であり、基準系によって形が様々であることから同様に絶対空間も否定された。

さらに10年以上の歳月を経て、ようやく定式化された一般相対性理論によって相対性理論は完成する。特殊相対性原理が成り立つ慣性系では、複雑な外力は働かないとしているために、一般的な重力場は存在しない。アインシュタインは加速度を持つ非慣性系での物理法則は、慣性系にとって、その系を基準としたときに重力が生じているとした場合と同じになるという、等価原理に着目した。そして特殊相対性理論の核であった、微小線素 ds を一定に保つという条件のみから、慣性系に限らずにあらゆる座標系で成立する一般共変な物理法則の構築を行った。その結果、今まで座標を基準に定めていた物理量から座標不変なスカラー、あるいは座標変換によって一定の規則で変化していくベクトルやテンソルが、重力場を扱う上で主流になった。微分幾何学の原理を元に、時空の構造は、重力源である物体のエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ 、時空の幾何を表わすリッチスカラー R 、リッチテンソル $R_{\mu\nu}$ を用いて最小作用の原理により、

$$8\pi GT_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R \tag{4}$$

と表わされることが示された。また計量テンソルは2式の世界間隔 ds を

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \tag{5}$$

のように一般化した際に表される変数である。アインシュタイン方程式を解くことで、各々定めた座標系において時空の計量テンソル $g_{\mu\nu}$ が計算され¹⁰⁾、時空は、一般には特殊相対性理論のミンコフスキー時空のような平坦なものではなく、いかなる座標系を選んでも不変な曲率 R を持ち、その構造は存在する物質の重力場に依存して決まることを意味している。既に特殊相対性理論によって絶対時空説の考えは退けられた中で、一般相対性理論によって時空計量が、存在する重力場によって定まる時空という概念が決定的に示されたことになる。そして一般相対性理論によって示される、光の湾曲や水星の近日点移動は観測結果と非常に精度良く一致していることが確かめられると、この新たな理論モデルがニュートン力学に替わる物理理論となった。ニュートン力学は、重力場が弱くて速度の遅い系を論じる場合の近似理論として相対性理論に組み込まれたのである。

これにより時空の哲学は一変する。ニュートン力学の枠組みでは、時間や空間自身の存在をそこに存在

する物体の分布や構造には全く依存せずに議論出来た。特殊相対性理論によって、宇宙の中のどこでも一様に流れる時間を仮定したニュートンの絶対時空説は否定され、さらに一般相対性理論によって、「存在する重力場によって変化する時空計量」が登場し、時空そのものが5式で示されるある種の構造を伴って議論されることになった。

一般相対性理論を単純に解釈すれば、時空は構造を持って存在している。しかしその構造は、我々が直接観測できるものではなくあくまで理論の対象である。その理論の対象を巡って、時空が実在するという実体説(substantialism)と、反実在論の関係説(relationism)の現代の対立を考察するために、次章では1980年代以降に進展した現代の時空に関する議論に焦点を当てる。時空の実在性を巡っては様々な議論が展開されているが、一般相対性理論が意味する時空の本質はどこに宿るのか?といった問題点を中心に、カール・ホフアーの計量実体説(metric field substantialism)、パウル・テラーの関係説、そしてマウロ・ドラートの時空構造実在論(structural spacetime realism)へと繋いでいく。本論文の最後では、結局この3つの立場は本質的には同じものであるということに触れる。まずは一般相対性理論的な時空では、実体説や関係説がそれぞれ意味する「時空の定義」を再構築する必要がある。

3. 一般相対性理論における時空の哲学

この章では、ニュートン力学時代におけるニュートンやライプニッツにそれぞれ起源を持つ実体説と関係説の、一般相対性理論における主張を考察する。まずは時空とは何を指すのかということで、同じ説の中でも立場の分かれる実体説の在り方を中心に話を進める。

3.1 実体説の定式化

まず、時空を実体(substance)だと見なす実体説論者(substantialism)の主張から入ろう。端的に言えば彼らの主張は、

時空は自然法則と矛盾せずに、物体とは独立に存在し得る¹¹⁾。

というものである。

ニュートン力学の提唱者であるニュートンにとっては、その正体は物体を全て取り去った場合に残る空の容れ物であり、絶対時空という枠組みであったが、一般相対性理論において、物体と独立に時空間の存在を考えることはどういう意味を持つかを考察したい。

ニュートン同様に、仮に物体を全て取り去った場合に、時空は存在するのかという問いに関しては理論的には答えが出せる。すなわち答えはイエスである。前章でも述べたように、座標系の構築を前提とする相対性理論には、最初からある種の時空が前提とされているからである。一般相対性理論により特殊相対性原理が成り立っていた慣性系とは、重力を及ぼす物質が全く存在しない特別な時空のことを指し、ミンコフスキー時空計量は確かに4式が示すアインシュタイン方程式の解を満たしていることがわかる¹²⁾。つまり、物体が全く存在しない時空はミンコフスキー時空になるという前提で、相対論は構築されたもので

ある。ニュートンのバケツに関して相対性理論を持ち出すと、バケツと水しか存在しない空間は、全体の質量は小さくて近似的に重力場は0だと見なすことが出来るので、慣性系すなわちミンコフスキー時空を用いても問題ないと考えられる。バケツを回転させるとは、慣性系に関して水とバケツを円運動で座標変換させることを意味し、回転しているバケツと水の座標系で見れば、等価原理により外向きに重力を生じているように見える。よって遠心力が発生し、水は淵の方向に盛り上がりニュートンの思考実験は結局のところ正しかったことになる。ただし、ニュートンにとってはバケツと水が回転しているのは絶対空間に対してであったが、相対性理論ではバケツと水は慣性系に対して回転していることになる。これはニュートンが持ち出した絶対空間の仮説が、一般相対性理論では慣性系に置き換わったと捉えるとも可能で、この新たな前提はアインシュタイン方程式の球対称な真空解の理論の中でも表れている¹³⁾。

相対性理論では、一般相対性理論が特殊相対性理論を土台にしている限り、ニュートンのバケツの答えでも述べたように、ミンコフスキー時空が物体（重力源という意味）が無くても存在するものとして、ある種の絶対時空的な枠組みを持っている。重力場が弱くて近似的にその影響を無視できる系、例えば量子場の理論等においては特殊相対性原理が成立していて、平らなミンコフスキー時空構造のモデルで説明が可能である。つまり現代の物理学において、重力場が存在しないと見なせる空間というのはミンコフスキー時空構造になるという前提を当然としている¹⁴⁾。

これより、物体を全て取り除いた空の時空というものがミンコフスキー時空に相当するという観点においては、物体とは独立に時空は存在している¹⁵⁾。しかし、このミンコフスキー時空が実体説の主張する時空の正体だと結論されるわけではない。ミンコフスキー時空とは、重力場がゼロの時空に存在する構造であるが、重力源が存在する系においても背後に存在しているわけではない。

なぜならば、物体が存在する系では物体の持つ重力場によって時空は曲率を持つからである。曲率を持つ時空に対して、ミンコフスキー時空のような平坦な座標系を構築することは不可能だからである。これは4式が示すように、物体の持つエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ によって、時空計量 $g_{\mu\nu}$ が変化するという意味であるが、そもそも計量を与えるということは、前提として何らかの座標系を考えるということを意図している。そしてその座標上に定義された点同士がどのような関係にあるかを示す役割として、無限小離れた2点間の微小変位量、局所的な計量 ds が与えられている。つまり物体が存在しない状況では、各計量テンソルが、 $g_{00} = 1$; $g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$ で与えられ（それ以外は0）、2式のようにミンコフスキー時空構造になることを要請している。

では一般に物体が存在し、重力の影響で各計量テンソルが他の値を示す場合は、任意の座標系に応じて計量を導出し時空構造を考えることになる。ここで時空点を定義する上では、数学的な道具として座標系と計量をそれぞれ与える必要性を述べたが、実体説論者にとってそもそも時空とは何に対応しているのかということ、一般相対性理論では明確に定義しておかなければいけない¹⁶⁾。

座標系と計量、これを微分幾何学上の言葉で表わせば、多様体(manifold) (座標点) に計量(metric) (点の関係) を与えたモデルになる。多様体は点の集合体である位相空間(topology) を表現しており、計量はその構造を表現している。では時空はそれ自体で実在しているという実体説の立場を貫くなら、その時空

我々がある対象を認識する際に、他のいかなる存在も必要とせず、ただあるがままに存在している対象

のみを理解する時、その対象は実体であるという²¹⁾。

このデカルトの実体の定義を認めた上で、改めて時空点の実体性を考える。時空点を実体だと認めるためには、その時空点が他の存在に依拠せずに単独で存在しなければならない。時空点は座標上の点として数値で与えられるが、この数値は座標系において任意に定められる原点、あるいは他の時空点に対する位置関係を示しているに過ぎない。すなわち座標変換すれば変化するものであり、その点にとって普遍的アイデンティティーではない。ではその時空点を時空点たらしめる実体的な要因はどこにあるのだろうか。そこで実体説において、ノートン、アーマン、ティム・マウドリン、ジェレミー・バターフィールド等は、時空点は個体原理(primitive identity)を持つと考えていた(Hoefer(1996)p14[4])。これは個々の時空点には、座標や計量における互いの位置関係とは別に与えられる性質で、点同士を互いに異なる実体として区別する上で必要な、普遍的アイデンティティーのことを指す²²⁾。ノートンらはアインシュタイン自身も長い間陥っていた「穴の議論」に関して、時空点が単独でアイデンティティーを持つという考えを適用した。多様体上のある点を写像で別の点に変換する際に、写像の前後では数学的には異なって表記された座標点が、それぞれの座標系で定義される計量を伴うことによって、物理的には同じ時空点に対応していると物理学者は考えている。この変換の前後での違いは単に数学的モデルの違いであって、本質的には両者を区別することが出来ないというライプニッツの「不可識別者の同一性」に基づいている。そして時空点が単独で区別できるということは、このライプニッツの原理に反しているというのである。なぜなら時空点が個体原理を備えていることは、仮に計量の情報が無くても点同士を互いに区別出来ることになるため、座標と計量を与えて初めて物理的な時空点に一意に定まる仕組みとは異なっていて、多様体上の点そのものが時空の性質を決めていることになり²³⁾、一般相対性理論の決定論的な因果性を崩してしまうからである²⁴⁾。

カール・ホーファーは実体説において、この個体原理が宿る時空点という考え方を棄却して²⁵⁾、計量すなわち重力場そのものが時空に等しいとした。つまり3の計量実体説こそが実体説の妥当な在り方だと述べている²⁶⁾。この立場では、多様体は時空点の連続性や全体的な位相を与える情報であり、局所的な計量を繋いで結果的に生まれる概念なのである。決して先行する概念ではない。時空は連続性と位相、そして計量による構造を備えていて、傾向性(disposition)(曲率や構造)を持つ存在物であるとホーファーは結論している(Hoefer(1996)p26[4])。この立場では重要なのは、計量によって生まれる時空構造が時空の本質であり、周りの構造を伴って初めて実体となる²⁷⁾。この解釈によればモノはあくまで重力源 $T_{\mu\nu}$ のみで、そこから発生する重力場は時空として、ある意味「物質的に」位置づけられるのである。以上がホーファーの論文を元にした、一般相対性理論における現代の実体説の変遷と解釈である。

3.2 実体説、関係説と構造実在論

時空の実体性を擁護する実体説論者に対して、関係説論者(relationist)の主張としては、

物理理論は時空点に言及せずに、存在している対象と対象の性質のみに依存して書き直すことができる²⁸⁾。

といったものである。ニュートン力学と違って、時空が曲率という構造を持つ一般相対性理論では、前提として計量や4式の右辺は、時空に関する（具体的に時空を何と定めるかという上述の問題はさておき）記述である。書き直すということは、時間と空間を仮定しない物理理論そのものを新しく構築するという、マッハ流力学のような試みだけを指すわけではなく、あくまで時空点そのものに言及せずに、一般相対性理論に現れる時空の数式や法則を道具主義的に理解すべきという、時空に関して反実在論の立場を取ることもである（Dorato (2000)p.1615[5]）。すなわち、もし時空点や計量といった物理量が、存在する物体や物体の性質に還元されれば関係説の要望を満たすことになる。既に特殊相対性原理が成り立つ時空として、物体の存在しない領域でもミンコフスキー時空が存在することを述べたが、関係説論者にとっては、この時空は物理的に存在するものではなく、数学的な解としての存在でしかないとも考えられる²⁹⁾。また多様体実体説の問題としても述べたように、計量を時空と切り離して物理的な場と定めるなら、物体や他の物理場の位置や距離関係は時空幾何を与える計量の性質に還元されるため、一種の関係説の立場と考えることもできる³⁰⁾。これはたとえ多様体実体説を棄却して、計量実体説で計量を時空に定めた場合でも実は同様である。計量を物理場（重力場）と捉える限りは、時空を表わしているものは数学的記述に過ぎない多様体ではなく、計量という物理場であるので結局時空は物理場の性質として還元されてしまう。つまり、関係説であるという見方もできる（Dorato (2008) p.27,28[19]³¹⁾）。

すなわち時空の本質を計量だと考えることは、ホーファーが唱えたような、時空自身が計量であるという計量実体説という解釈にも、時空は計量という物理場の性質だとする関係説という解釈にも、どちらも取る事が出来るということを示している³²⁾。

そこで再び計量実体説の主張に立ち戻りたい。ホーファーの主張では、重力場の持つ傾向性(disposition)は、そこに存在する時空（モノの占めていない領域）に宿るものとして時空を実体だとしている³³⁾。しかし関係説論者であるパウル・テラーは、時空点ではなく計量が時空を表わしているという、ホーファーとほぼ同じような結論に辿り着いていながらも、この計量（場）の傾向性を、実体である時空の傾向性ではなく、その領域に物体を置いた場合にどのように動くかを示した傾向性と定め³⁴⁾、時空そのものの実在を意図していない³⁵⁾。計量が時空の本質であるという主張は、肝心の時空の実在に関しては曖昧なままなのである。すなわち、

時空の本質を計量だと定めることは、実体説とも関係説ともどちらでも解釈できる³⁶⁾。

そしてこの時空の実在性を、別の形でさらに定式化したのがマウロ・ドラートである。ドラートはホーファーが行き着いたように、2000年の論文で多様体ではなく計量こそが時空を表わしていて、時空点は計量という構造を伴って初めてアイデンティティー(identity)が与えられることに注目した。そしてエネルギーや運動量を伝搬する重力場は、他の物質場と同様に互いに影響し合いながらも、なおかつ時空

として各点や物体の位置として、4次元座標を定義する性質を担っているという意味で、旧来では相反するものとされていた、物質性と時空性の二面性を備えていると表現している（Dorato (2000) pp1611-1612[5]）。計量は構築する座標に依存するものであって、座標系によって様々な表現形式を持つが、ドラートは座標変換によって変換する一連の計量群のことを時空と定めた[5]。ここでドラートは、時空の実在性を表わすためには新たな哲学的観点が必要ということで、従来の空の時空（substantialism）も、時空の反実在論（relativism）をも両方否定する形で、時空を構造実在論に応用した第3の時空構造実在論（structural spacetime realism）を本格的に提唱した³⁷⁾。これはニュートン時代の実体説と関係説の旧来の在り方を捨てると同時に、物質と時空の2つの性質を帯びた計量という概念に関して両立場をある意味共有する主張でもあり、一般相対性理論における新たな時空説である。すなわち時空構造実在論とは、計量によって生じる時空構造、言い換えるなら時空の点同士に関係を示す（relationalな）特性を与えつつ、なおかつ時空の幾何構造そのものが物理世界によって表わされているという立場となる³⁸⁾。

これは計量によって表わされる時空構造が、物体とは独立に実在しているということである。この定式化に関して以下に詳しく分析する。

時空構造実在論とは、文字通り時空構造は真に実在しているということだが、「真に実在する」という言葉には、哲学的に考えると次の3つの意味に分けることができる³⁹⁾：

1. 時空構造は精神とは独立に (mind-independently) 存在する。
2. 時空構造は物理系を記述するための数学的構造として存在する (platonic realism)。
3. 時空構造は自然法則を生み出し、事象や他の物理的対象等には完全には付随しない (non-supervenient) 構造を与える。

この3つの中で、時空に関する構造実在論に当てはまるのは1と3である。一般相対性理論は、時空の構造を述べたものであるが、その時空の幾何構造は、例えば星の動きや光の湾曲等を通して間接的に確かめることはできる。それゆえに現実の物理世界とは独立に、数学的構造だけが普遍的に存在しているわけではないので2は当てはまらない。多様体のような数学的構造のモデルとしてではなく、物理世界の中になれっきとした構造として精神に独立に表れている。そしてその構造は、粒子の測地線方程式といった自然法則を生み出している。時空構造から得られる関係 (relation) とは、そこに存在する関係項（事象等）の個体原理に付随して決まるものではなく、逆に関係のみが先行して関係項にアイデンティティーを与えているのである。時空は要素群 (Forms)（計量によって生じる時空点同士の関係）を構成しており、その要素群は物理世界とは切り離して独立に普遍的に存在するものではなく、物理現象、例えば物体やテスト粒子の運動等を介在して物理世界に確認できるという意味において、テラーが結論したように関係説のように聞こえるかもしれない。

しかし関係説論者が主張するように、時空は決して道具主義的なものではなくて、時空構造としては確かに存在しているとする。以上より時空構造実在論における時空の実在を次のようにまとめることができる：

時空が実在することの意味は、物理世界が時空構造を具現していて、なおかつその時空構造が数学的に記述されることである⁴⁰⁾。

時空は、物理系の構造の一部として確かに存在している。その存在は物体とは独立に、時空構造全体が独立して構造を持っており、時空点は全体の中での関係(relation)においてのみアイデンティティーを与えられている。これは重力場によって生じる時空構造(計量群によって表わされる構造は、座標の選び方により様々である)は、全体で実在しているということである。そしてこの時空構造を生み出す重力場により、質量を持つ物体は運動の軌道を曲げられるが、これは時空という観測不可能な理論的存在(theoretical entity)が、他の物体に及ぼす(運動の軌道を変える)因果的性質(causal property)を備えているのではなく、他の物理的な存在物によっても生じる時空の関係を示す(relationalな)幾何的性質によって物体の運動が引き起こされるのである。性質は形而上学的には存在物(entities)の持つ因果的な力とされているので、そういった意味においては、時空構造実在論は実体説と関係説を統合したものである(Dorato (2000) p1617[5])。重力場は物理的な場であるが、一般相対性理論では計量を時空と考える限り、計量の存在しない「空の時空(empty)」を考えることは出来ないので、重力場と時空を分けることは不可能である⁴¹⁾。時空構造は重力場を表現したものであり、時空構造と重力場(計量)は等価である。例えば強い重力場の下では時間が遅く進むという現象に関しても、時間という実体があるのではなく、強重力場の影響の中で、物体の動きを時計に見立てて間接的に計った時間という性質が存在しているのである。その性質が重力場の性質、すなわち重力の強さとして確かに実在している。時空間という概念、ひいてはその関係を生み出しているのは重力場なのである⁴²⁾。

時間と重力、あるいは計量(時空の幾何構造)と重力場が同じものであるならば、もし重力場が実体として存在しているとすれば、それと等価な計量、すなわち時空も実体として存在していることになるのではないかという反論があるかもしれない。しかし場というものは4次元空間では、物理的变化によって絶えず変わっていくものであり、例えば黄色から赤色に性質を変えても、自身の存在を変わずに保ち続ける交通信号のような実体とは明らかに違っている⁴³⁾。重力場はモデルの中で計量という形で表わされるが、座標系によって計量は異なるので時空構造は座標系に依存している。すなわち観測者によって時空構造の実在の在り方は変わってくる。時空構造を表わす数学的モデルは無限に存在することになる。これは時空点は時空構造を伴って初めて意味をなすということで、座標変換すれば点は別の点へと変わるが、その時空点は時空構造の中で初めてアイデンティティーを与えられ、変換の前後で物理的には同じものであるということが示される。つまり時空点を表わす数学的な座標の値そのものには、決して本質的な意味は無いという意味で時空点そのものは単独で存在していない(Dorato(2000)pp1610[5])。時空構造実在論はこの一般相対性理論の物理的、そして共変性という数学的モデルの性質を見事に満たしているので、実体説と関係説に代る妥当な時空論だと言えるだろう。

構造実在論の定式化にはこれ以前にも以後にも様々な問題を孕むが、最後にホーファーの計量実体説、テラーの関係説、そしてドラートの構造実在論が時空が関係(relation)、すなわち構造(structure)の中で、

そしてそれのみによって構成されていることを暗示しているという点で、3人の立場が名前は違えども等しい時空論を展開していることを改めて認識したい。そのことを示すために仮想的に物質的配置を全く同じように与え、さらに時空構造さえも完全に等しくするために、初期条件なども全く同じように与えた2つの部屋を考える。この2つの部屋のみが同じ宇宙の中に存在し、お互いの重力場は無視できるほど離れているとしよう。この時空の概念図3において、2つの部屋Aと部屋Bの矢印で示した2点の時空（空間）点は、上の3つの立場ではいずれも全体の構造や関係の中でアイデンティティーが与えられる。この時空点がモノとして実在しているのかということに関しては、ホーファーとテラーで意見が分かれるかもしれないが、その与えられるアイデンティティーは等しく、従って3者はこの2点は実質的に区別が付かない（入れ替え不変）と述べていると解釈できるだろう。2点は多様体上では別々の点であるが、計量の中では同一の点なのである。これこそが時空の正体を多様体ではなく計量に置くことの共通した本質である。そしてこの重力場の存在をどのようにして定式化するかということで、3つの立場はそれぞれ分かれたのであると考えられる。

4. 結論と今後の指針

以上より重力場によって定義される時空の実在に関して、ホーファーは各点ではなく時空は構造の情報を含んだ状態で実体だと述べ、テラーは実在するものではなく、そこに物体があると仮定した場合の性質だと考えた。時空構造実在論はこの主張をまとめて、時空点は全体の構造の中での関係を示す要素においてのみ実在しており、その構造は他の物体の動きや現象によって、間接的に得られるものであるとしている。ただし時空構造実在論では、ホーファーが言うように時空を完全に独立した実体とは認めず、テラーが言うように物体のみに依存しているわけでもなく、この点に関しては丁度中間的な主張となる。

2008年にエスフェルドとラムによって、時空に関する構造実在論は時空点のアイデンティティーは、時空構造とセットで与えられるという意味で穏和な構造実在論(moderate structural realism)として分類された⁴⁴⁾。これは構造実在論の提唱者でもある、ジョン・ウォラルが初めに定式化した、構造の中の各要素のアイデンティティーは、構造の中にありながら決して我々の認識出来ない固有の性質を備えているとする認識的構造実在論(epistemological structural realism)[26]や、レディマンやフレンチ等が唱えた、存在するのは構造だけでその中の各要素の存在等認めないとする過激な存在的構造実在論(ontological structural realism)[27]と対比されている⁴⁵⁾。

ホーファーの実体説、テラーの関係説、そしてドラートの時空構造実在論の要旨をまとめると、一般相対性理論を理解する上では、時空間の本質は計量が与える時空構造にあると言える。3人の主張は、時空の本質が各点ではなく全体の構造の中で与えられるということに着目した点で一致していて、個体原理を取り払った「モノの存在論」にコミットしている。物理学において時空の正体は何であるかという哲学的考察は、実体や理論的存在の新たなカテゴリーを生み出すきっかけとなる可能性を含んでいると私は考えている。そしてこの時空における構造実在論という解釈が、現代物理学の最先端である量子重力や宇宙論

の分野でどのように応用あるいは解釈できるかが今後の課題である。またそれらの解釈を元に、時空の存在はモノの存在とどのような意味で等しく、どのような意味で異なっているのか、こういった根本的形而上学的な問いかけにもさらに深く迫っていきたい。

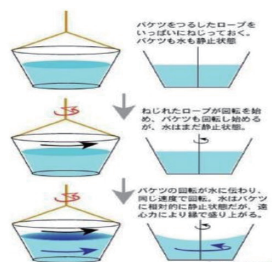


図 1:ニュートンのバケツ：ロープとひも、水の入ったバケツだけの世界で、ロープを振ってバケツを回転させる。最初はバケツだけが回転するが、慣性の法則によって、やがてバケツの運動は水にも伝わり、バケツと水は一体となって回転を始める。この時に水には遠心力が生じて、バケツの淵に盛り上がりて回転するので、水は絶対空間に対して回転運動をしているという主張である。Copyright:Soshichi Uchii

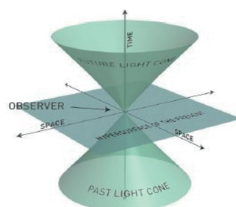


図 2:ミンコフスキー座標：縦軸が時間、横軸（この図では2次元）を空間で表わした特殊相対性原理が成り立つ慣性系での時空座標。現在の時刻 $t=0$ を基準にして、光円錐（各々の時刻で秒速 c の光が到達できる最大距離を結んだ図形）の内部を過去と未来において因果関係を持てる領域と定めている。

Copyright:Stib and K.Aainsqatsi

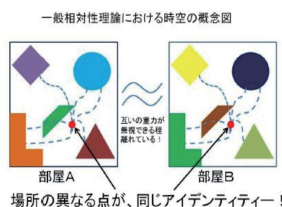


図 3:時空間のアイデンティティ：大きさの同じ部屋Aと部屋Bを、お互いの重力場が無視出来るぐらい、十分遠くに離れた場所に用意する。部屋の周りには、お互いに重力を及ぼすものは何も無いとする。この2つの部屋の中に、質量（重力）と形の全く等しい物体を、全く同じ配置で並べるとする。この時、2部屋の中の空間（物体が占めていない点）を考える。もし初期条件等が等しければ、部屋の壁からの位置関係が等しい点同士、例えば矢印を付けた2点は、部屋の中の物体の重力場によって、全く同じ空間構造を

持っていることになる。一般相対性理論の枠組みでは、この2点を、時空構造以上の情報で見分けることはできないので、この2点は空間上、別々の場所の点ではあるが、同じアイデンティティーを持っているということになる。

註

- 1) この対立は、古典力学を元にした原始的な時空論だが、本論文のテーマとなる実体説 (substantivalism) と関係説 (relationism) の土台は、このニュートン力学に基づいている。ただし実際にニュートンとライブニッツが、それぞれ現代の意味で使われている実体説と関係説の立場を取っているかどうかに関しては様々な主張がある。例えば近年の研究では、次章で紹介する絶対時空説を唱えたニュートンでさえ各時空点を、3.1で述べるように、デカルトが定義した意味で substance だと考えていたわけではないという見解がある。詳しくは、Alexander(1956)[1], Stein(2002)[2], Earman(1979)[3] 等を参照。
- 2) ニュートンのこういった信念は、「自然哲学の諸原理」の別名「プリンキピア」第二版の一般的注解の中で表現されている [6]。
- 3) ニュートンは、神が物質を知覚するために時間と空間が必要で、物を認識するためには、時空間を介さなければいけないという信念を持っていたと考えられている (Alexander(1956)p15[1])。
- 4) 次の章で示すが、今日の関係説の一般的な見解でも、時空はそれだけで存在している実体ではなく、モノ同士の関係を表すための性質 (property) だとしている (Edward Slowik(2009)[7])。
- 5) ただし冒頭で述べたように、ニュートン自身の絶対時空説が、現代で使われている時空点の実体説を指しているかどうかは議論の余地がある。この論文では、実体 (substance) という言葉を、あくまで机やボールのような時間を通して目に見えて存在するモノの意味で使用し、場や電子といった理論的存在 (theoretical entity) の存在論とは独立に論じる。最終的に時空の実在に関して、そういった理論的存在ともまた別のカテゴリーを与えるつもりである。
- 6) ニュートンのバケツでは、バケツに対する水の回転と真空に対する水の回転の2つの回転を扱っているが、ここでは真空に対する水の絶対回転のみを論じるものとする [8]。
- 7) 例えば宇宙空間から地球以外の全ての星が消えてしまった場合、関係説の立場では地球の自転は意味を成さなくなるが、果たして遠心力まで消えてしまうのかといった問題もある。
- 8) これらの関係説の力学はマッハ流力学と呼ばれ、時空に替わる「プラトニア」と呼ばれる概念 [9] を用いて、現在は相対性理論に拡張しようと試みられている。
- 9) ニュートン力学の再構築に関しては、ニュートンとライブニッツの論争の核心に迫る興味深い結果も出ている [10]。
- 10) ここで μ や ν の添え字は 0 から 3 までの数字を意味しており、それぞれの座標軸の単位 ct, x, y, z に対応している。また $g_{\mu\nu}$ は対称テンソルであるために ($g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$)、方程式を完全に解くためには合計 10 個の $g_{\mu\nu}$ を求める必要がある。
- 11) Hoefer(1996)p.5[4]
- 12) 重力場の無い平坦な時空では $T_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} = 0$
- 13) シュヴァルツシルト計量やカー計量の導出等がその最たる例である。
- 14) アインシュタイン方程式の解を満たすという意味では、例えば、

$$ds^2 = -cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (6)$$
 に収束する時空構造も理論上はあり得る。この計量の物理的な意味を考えるのは難しいが、こういった解が認められていないのは、やはり重力場がゼロの時空はミンコフスキー時空構造以外にはあり得ないという、相対性理論の暗黙の了解だと考えられる。
- 15) この時空の前提を完全に覆して、マッハのような古典的な関係説に徹するためには、前章で述べたように時空を物体の位置関係のみから再構築する関係説の力学を、一般相対性理論へと拡張させるしかないように思える。
- 16) 一般相対性理論において時空を記述する上で、数学的にこの座標系と計量が必要であることは、時空間の構造を考

える必要の無いニュートン力学において時空点を定義する上では、数学的に座標だけで十分だったことと対応している。

17) この呼び名は、カール・ホーファーが、自身の論文 (Hofer (1996)[4]) で順に定式化したものである。

18) アーマンとノートンは、後に説明する「穴の議論」に際して、多様体実体説を支持することの難しさを主張している (Earman and Norton (1987)[12])。

19) ただしホーファーは、前者で述べた、計量が伝搬するエネルギーや運動量は、数学的には疑似テンソル $t_{\mu\nu}$ と呼ばれるものであり、 $T_{\mu\nu}$ で表される物理量ではないために、各物体のエネルギー運動量テンソルとは性質の上でも根本的に異なっているから問題は無いとしている。また計量は仮に物質が存在しない場所 ($T_{\mu\nu} = 0$) でさえ値を持つ ($g_{\mu\nu} \neq 0$) ために、他の物質場とは性質上異なっていると述べている [4]。

20) ここで使われている関係説の意味は、続いて関係説の立場を述べる際にも後述する。

21) デカルトの引用文 “when we conceive a substance, we understand nothing else than an entity which is in such a way that it needs no other entity in order to be.” (Descartes(1644)[14]) より

22) primitive identity は別名 primitive thisness とも呼ばれていて、元々は各々の個物は個体原理 (primitive thisnesses) を備えているという考え (Adams(1979)[15]) に倣ったものである。

23) 個体原理を考える限り、多様体実体説も多様体+計量実体説も穴の議論での問題に陥るが、ノートンやアーマンはあくまで多様体実体説として議論を展開している。

24) 詳しくは、Earman and Norton(1987)[12] を参照のこと。ノートンらは、一般相対性理論が非決定論的なものであると諦めるか、それとも実体説 (ノートンらが指しているのは多様体実体説であるが、文脈的に個体原理を備えた多様体+計量実体説も含まれる) を棄却するかのかのいずれかであると帰結している (p524)。

25) ホーファーは、実体説に関して個体原理を最初に捨て去ったのはアンナ・メイデンズだと紹介している (Hofer(1996) p14[4])。

26) ホーファーは時空の実体説の段階として、まず多様体実体説を挙げて、続いて計量の伴った多様体という概念で多様体+計量実体説を紹介している。最後に、問題となった時空点に宿る個体原理という考え方から脱却する実体説の在り方として、計量実体説を提唱し、「全体の位相 (topology)」を表わす多様体の情報が無くても、局所的な点同士の間隔を表わす計量がわかっていれば、時空を記述することが可能だとしている。また一般相対性理論において、本質的な役割は計量が担っているという点も計量実体説を動機付ける上で重要である (Hofer(1996)pp24-25[4])。

27) ホーファーは、近年もなお研究が続いている量子重力 (量子力学が扱う、ミクロな系における一般相対性理論) の分野でも、実体説と関係説の議論は重要な役割を担っていると述べている [16]。計量実体説の主張は、アーマン、ノートンによって旧来の実体説の立場で考えれば、計量を物理的対象の容れ物だと見なすことは出来ない既に指摘されており [12]、計量というものとは多様体があるからこそ存在し得るもので、計量を包括している独立した実体 (時空) があるはずだという反論もある。

28) Butterfield (1984)p.101[17]

29) 関係説論者にとって、ミンコフスキー時空を前提とする相対論的量子力学を扱う際にも、時空を表わすパラメータを場の性質に還元することは難しい問題である [18]。

30) この場合は単に計量が物理場であり、時空そのものではないという意味で、時空の数式や座標値等は全て場のパラメータだという主張である。

31) 相対性理論の性格ゆえに時空と物質、すなわち重力場と他の物理場の線引きが曖昧なために、重力場を新たに物質的なモノと解釈すれば、このような見解も一つの方向性を持つ。

32) これは一般相対性理論や場の理論の枠組みにおいては、実体説と関係説の対立は本質的なものではなく、仮に同じ主張であってもどちらの解釈を選ぶかという言葉上のものである (Rynasiewicz(1996)[20]) という言明を支持している。

- 33) この実体は前節でも述べたように、各時空点ではなく計量によって定まる局所的な時空構造を含めて指している。
- 34) 物体の位置関係において、実際のモノの関係だけを表した狭義の関係説 (narrow relationism) ではなく、あらゆる可能性を含んだ世界を表した寛大な関係説 (liberalized relationism) が本質だとテラーは説いている。
- 35) Hoefer(1996)p25[4], Teller(1991)p396[21] テラーにとっては時空の本質は、質量 (mass) と同じくその関係 (relation) において与えられるという結論に達している。
- 36) これはホーファーの実体説とテラーの関係説に関する見解であり、実体説と関係説が議論を繰り返していく中で発展した、1つの道筋である。
- 37) ドラートは自身の2つの論文で、第3の時空論を掲げるきっかけを作ったのは、時空の実体説と関係説の対立はかつての科学的事実論と反事実論の対立に似て、蛇足で範疇を超えている (supererogatory) と述べているという主張 (Stein (1967)p.193[22]) に倣ったものだとしている (Dorato(2000)p1613[5], (2008)pp28-32[19])。
- 38) ここで言う「関係を示す (relational な)」とは、従来の関係説 (relationism) の意味における物体同士の関係ではなく、時空点同士の関係を示す (relational な) 構造のことを指していることに注意したい。
- 39) ドラートは、この実在の意味を定式化したことで、一般相対性理論では時空を実体説か関係説のいずれかに分類することは実質不可能だと留めた、30年以上も前のステインの見解を発展させたのである。
- 40) 以上の時空の実在に関する定式化は、Dorato(2000)pp1614-1615[5] を引用したものである。
- 41) 前節でも述べたように、この空の時空とは多様体のことを指し、重力場と時空を完全に分けることは多様体実体説の考えに戻ってしまう。
- 42) かつて性質を持つものは実体だとされていたが、ひも理論における高次元上のひもや素粒子といった、明らかに観測不可能なものである理論的存在を扱う上で多くの可能性が検討されるようになった [23]。
- 43) これは、2000年の論文でドラートが最後に述べた見解であるが [5]p1626、そもそも実体を伴うモノとは何であり、時間の変化と共に同一なものなのかということは、根本的形而上学的に深く議論する必要がある [24]。
- 44) ただしエスフェルドとラムは、時空構造実在論は分類上は根本的には実体説に基づくものとしているために、ドラートの見解とは異なっている (Esfeld and Lam(2006)pp.42-43[25])。
- 45) ドラート自身が時空構造実在論に関して、この存在的構造実在論を完全に否定しているのかどうかは不明である [19]。

参考文献

- [1] Alexander H.G.(ed.), "The Leibniz-Clarke Correspondence" New York, Barnes and Noble. (1956)
- [2] Howard Stein, "Newton's metaphysics" in The Cambridge Companion to Newton, Cambridge University Press. (2002)
- [3] John Earman, "Was Leibniz a Relationist?" Midwest Studies In Philosophy Volume 4, Issue 1, pages 263-276. (1979)
- [4] Carl Hoefer, "The Metaphysics of Space-Time Substantivalism" The Journal of Philosophy, Vol.93, No.1, pp.5-27 (1996)
- [5] Mauro Dorato, "Substantivalism, Relationism, and Structural Spacetime Realism" Foundations of Physics.30, 1605-1628 Plenum Publishing Corporation. (2000)
- [6] 河辺六男訳『世界の名著・ニュートン』中央公論社 (1971)
- [7] Edward Slowik, *Newton's Metaphysics of Space: A "Tertium Quid" betwixt Substantivalism and Relationism, or Merely a "God of the (Rational Mechanical) Gaps"?* Perspectives on Science Volume 17, Issue 4, pages 429-456 The Massachusetts Institute of Technology (2009)p.432
- [8] Robert Rynasiewicz, "By their Properties, Causes, and Effects: Newton's Scholium on Time, Space, Place, and motion-1. The Text," Studies in History and Philosophy of Science, 26:133-153 (1995)
- [9] Julian.B.Barbour, "Relational Concepts of Space and Time," British Journal for the Philosophy of Science, 33:251-274 (1982)

- [10] Julian.B.Barbour, “ *The End of Time* ” phoenix (2000)pp118-119
- [11] 内井惣七『空間の謎・時間の謎—宇宙の始まりに迫る物理学と哲学』中公新書 (2006) 19
- [12] John Earman and John Norton, “ *What price substantivalism:The hole story,* ” British Journal for the Philosophy of Science,38,515-525(1987)
- [13] Tim Maudlin, “ *The essence of space time,* ” in Philosophy of Science Association 1988, Vol.2,A.Fine and J.Leplin, eds. (East Lansing,Michigan.1988), pp.82-91
- [14] Descartes R. (1644), *Principia Philosophiae*, transl. by B. Reynolds, Principles of Philosophy, E. Mellen Press, Lewiston, NY, 1988.
- [15] Robert Adams, “ *Primitive Thisness and Primitive Identity* ” (January 1979)p5-26
- [16] Carl Hoefer, “ *Absolute versus relational space-time:for better or for worse,the debate goes on* ”British Journal for the Philosophy of Science,49(3),451-469(1998)
- [17] Jeremy Buttereld,“*Relationism and Possible Worlds1* ”British Journal Philosophy Science (1984) 35 (2):p101-113
- [18] Dennis Dieks,“*Space-time relationism in Newtonian and relativistic physics* ”International Studies in the Philosophy of Science Volume 15, Issue 1, (2001)p.5-17
- [19] Mauro Dorato,“ *Is Structural Spacetime Realism Relationism in Disguise?The Supererogatory Nature of the Substantivalism/Relationism Debate* ”Philosophy and Foundations of Physics Volume4,17-37(2008)
- [20] Robert Rynasiewicz, “ *Absolute versus Relational Space-Time: an Outmoded Debate?* ”, The Journal of Philosophy, 43, 1: 279-306.(1996)
- [21] Paul Teller, “ *Substance, Relations, and Arguments about the Nature of Space-Time* ”The Philosophical Review Vol. 100, No. 3(July 1991), pp. 363-397
- [22] Howard Stein, “ *Newtonian Spacetime* ” Texas Quarterly 10,pp174-200 (1967)
- [23] Merrilee H.Salmon,John Earman and Clark Glymour et al,“ *Introduction to the Philosophy of Science* ”Prentice-Hall(1992)
- [24] Theodore Sider,“ *FOUR-DIMENSIONALISM:An Ontology of Persistence and Time* ”Oxford University Press (2001)
- [25] Michael Esfeld and Vincent Lam,“ *Moderate structural realism about space-time* ”Springer Science+Business Media B.V .(2006)
- [26] John Worral, “ *Structural realism* ”Dialectica 43, pp99-124 (1989)
- [27] Steven French and James Ladyman,“ *Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure* ”Synthese, Volume 136, Issue 1, pp 31-56(2003) 21

The Development of Structural Realism through Substantivalism and Relationism Regarding Spacetime in General Relativity

Sho FUJITA

Abstract:

There have been ongoing debates on the existence of spacetime for a long time. This paper will offer one way to interpret more recent debates and present the important aspects of the philosophy of spacetime. General Relativity shows spacetime has a curvature and is bent, due to the influence of matter. While substantivalists claim that the bent spacetime exists like other matter and fields, relationists claim that spacetime should be reduced to such matter or their properties. In 2000, structural spacetime realism was advocated, and as a new perspective, it reconciled conventional substantivalism and relationism. Structural spacetime realism recognizes spacetime exists as a whole structure made by metric (gravitational) fields and not by manifolds. Physical worlds exemplify this structure and can be described mathematically. However, I think not only this structural spacetime realism but also some substantivalists and relationists can agree that the nature of spacetime consists in metric and the whole structure created by metric is spacetime's unique identity. Through this paper, making allowance for general covariance in General Relativity, I will reveal that it is the "relation" which is important, and realists and anti-realists, including structural realists, discuss spacetime in the same way despite differences in their formulations.

Keywords : philosophy of spacetime, substantivalism, relationism, structural realism, General Relativity